

УДК 629.4.051.2:629.4.07

Совершенствование системы защиты от юза пассажирского электровоза

П. Г. Колпахчян, В. Е. Андреев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Колпахчян П. Г., Андреев В. Е. Совершенствование системы защиты от юза пассажирского электровоза // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 2. С. 100–113. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-100-113.

Аннотация

Цель: совершенствование алгоритмов защиты от юза и боксования с помощью новых методов обнаружения избыточного скольжения колесных пар локомотива, позволяющих обеспечить раннее определение момента потери сцепления. **Методы:** эффективность системы защиты от юза во многом определяется надежным определением возникновения избыточного скольжения колесных пар. Решение этой задачи требует развития методов выделения сигналов угловой скорости вращения и углового ускорения КП с учетом динамических процессов в механической части локомотива и помех в канале измерения. Поэтому в статье рассмотрены вопросы обработки сигналов частоты вращения, выделения информации о величине избыточного скольжения и углового ускорения КП для использования в системах защиты от юза и боксования. Одним из критериев, которые позволяют повысить надежность обнаружения юза предлагается использовать «Расчетное время до блокировки колеса». Его значение позволяет оценить расчетное время до заклинивания колеса (прекращения вращения). Введение этого критерия позволяет более точно определять риск полной остановки вращения КП и повышает надежность определения возникновения юза. **Результаты:** установлено, что для устранения ошибок канала измерения и выделения сигнала об угловом ускорении КП в условиях наличия колебаний, вызванных наличием эффектов пространственной динамики локомотива, целесообразно применение дискретного фильтра Калмана. Обработка сигналов с использованием фильтра Калмана при наличии опорного сигнала позволяет существенно снизить влияние пространственных колебаний экипажной части электровоза при движении по пути с неровностями на выделяемые сигналы угловой скорости вращения и углового ускорения КП. Это дает возможность снизить пороги срабатывания и идентифицировать юз и боксование до появления значительного избыточного скольжения. **Практическая значимость:** показана необходимость применения комплексных критериев, основанных на анализе не только скорости проскальзывания колесных пар, но и угловых ускорений, для выявления избыточного скольжения колесных пар локомотивов. Их использование в системе управления локомотива позволяет обнаружить потерю сцепления на ранних стадиях возникновения боксования и юза и улучшить использование сцепного веса локомотивов.

Ключевые слова: защита от юза, взаимодействие пути и подвижного состава, сцепление колес с рельсами, проскальзывание колесных пар, алгоритм обнаружения юза.

Введение

Система торможения является одной из наиболее важных для обеспечения безопасной эксплуатации железнодорожного транспорта. Появление юза в результате ухудшения условий сцепления в месте контакта «колесо — рельс» приводит к повышенному износу колесных пар и снижает эффективность торможения.

Одним из наиболее опасных последствий юза является появление ползунов при блокировке колес [1]. Повышение эффективности устройств борьбы с юзом является важной задачей, решение которой необходимо для совершенствования подвижного состава.

Система борьбы с юзом должна обеспечивать максимально возможное по условиям сцепления тормозное усилие и не допускать возникновения ползунов. Для этого необходимо решение задач обнаружения юза, снижения момента торможения на колесной паре и его восстановления после прекращения юза.

Наиболее сложным является борьба с юзом при пневматическом торможении, так как возможности снижения силы торможения ограничены свойствами пневматической тормозной системы. В этом случае применяется ступенчатый отпуск тормозов с последующим восстановлением торможения.

В настоящее время осевая мощность электровозов достигла таких величин, что в режиме тяги большую часть времени электровозы и тепловозы практически полностью используют возможности сцепления в месте контакта «колесо — рельс». Реализация силы тяги на пределе по сцеплению происходит при тяжело-весном движении, а также при движении на участках со сложным профилем [2, 3]. Поэтому все современные электровозы оснащаются современными системами защиты от боксования и юза.

Необходимо отметить, что использование традиционных систем защиты от юза и боксования не потеряло актуальности, так как все равно необходима для защиты от юза и блокировки КП в режиме пневматического торможения. В настоящее время на различных полигонах железных дорог России продолжается эксплуатация большого парка пассажирских и грузовых электровозов с коллекторными ТЭД, которые могут эксплуатироваться еще 15–20 лет, так как их конструкция допускает продление срока службы. Это пассажирские электровозы постоянного тока ЧС200, ЧС7, переменного тока ЧС8, грузовые ВЛ11 и ВЛ15. На такие электровозы штатно были установлены достаточно простые, релейные системы защиты от боксования и юза, на пассажирских локомотивах дополненные аналоговой системой. Такие системы не обеспечивают надежную защиту от боксования и юза, морально и физически устарели. Поэтому актуальной является их модернизация.

Формулировка проблемы

Силы тяги и торможения на подвижном составе железных дорог создаются колесными парами (КП) за счет трения в месте контакта «колесо — рельс» (сила сцепления). Величина силы сцепления зависит от силы нажатия и состояния контактирующих поверхностей. При несоответствии момента от силы сцепления, моменту от сил тяги или торможения, возникает процесс боксования (юза), который характеризуется быстрым ростом или замедлением КП и значительным снижением силы тяги или торможения.

Особенно опасным с точки зрения безопасности движения является развитие юза до полной остановки (заклинивания) колесных пар при торможении, так как это увеличивает тормозной путь и приводит к появлению ползунов. Поэтому при создании подвижного состава и организации движения используются системы и применяется комплекс мер, направленных на предотвращение или прекращение боксования или юза.

Эффективное подавление уже возникшего боксования или юза требует снижения тягового или тормозного усилия с высоким быстродействием. Как показали результаты исследований процессов боксования тягового электропривода [4], для ликвидации возникшего избыточного проскальзывания КП необходимо регулирование электромагнитного момента тяговых двигателей с постоянной времени порядка 7–10 мс. В системах механического торможения невозможно добиться скорости снижения тормозного усилия, необходимого для эффективной ликвидации юза из-за низкого уровня быстродействия пневмосистемы. Для повышения надежности обнаружения избыточного скольжения КП, в системах защиты от юза и боксования целесообразно использовать информацию об угловом ускорении КП. Определение углового ускорения требует дифференцирования сигнала об угловой скорости вращения в реальном времени и затруднено наличием колебаний при движении по пути с неровностями и помех измерения.

Эффективность системы защиты от юза во многом определяется надежным определением возникновения избыточного скольжения КП. Решение этой задачи требует развития методов выделения сигналов угловой скорости вращения и углового ускорения КП с учетом динамических процессов в механической части локомотива и помех в канале измерения. Поэтому в статье рассмотрены вопросы обработки сигналов частоты вращения, выделения информации о величине избыточного скольжения и углового ускорения КП для использования в системах защиты от юза и боксования.

Алгоритм обнаружения избыточного скольжения колесных пар локомотива

Системы Wheel Slide Protection (SR-WSP) [5], применяемые на современном подвижном составе, предназначены для обнаружения скольжения, когда избыточное проскальзывание превышает некоторую пороговую величину, после чего следует срыв. Однако в ряде случаев реализуемое такими системами замедление оказывается недостаточным. В [6] приведен пример недостаточного замедления, где, несмотря на то, что давление в ТЦ было установлено выше нормального уровня, в этом случае «скольжение» в основном обнаруживалось чрезмерными значениями углового замедления КП. Необходимо было найти решение для того, чтобы избежать этого. Пороговое значение скорости избыточного скольжения является константой в системах WSP, которое сравнивается с переменным значением

скорости во время торможения, за исключением фазы для низкой скорости, перед остановкой подвижного состава.

Когда порог «скольжения» высокий, само скольжение трудно обнаружить, а задержанное обнаружение увеличивает риск заклинивания колес и, как следствие, неизбежные ползуны. Более того, сам метод «фазового опорожнения» также увеличивает риск заклинивания, поскольку время, требуемое для истощения давления в ТЦ, становится больше.

Одним из критериев, которые позволяют повысить надежность обнаружения юза, предлагается использовать «Расчетное время до замыкания колеса», которое определяется следующим образом (рис. 1):

$$T_L = \frac{v_k}{\beta_k},$$

где v_k — линейная скорость точки на КП в месте контакта «колес — рельс» (скорость оси);

$\beta_k = dv_k/dt$ — замедление оси.

Эта величина также может быть определена через угловую скорость вращения и угловое ускорение КП:

$$T_L = \frac{\omega_k}{\varepsilon_k},$$

где ω_k и ε_k — угловая скорость вращения и угловое ускорение КП.

Значение T_L позволяет оценить расчетное время до заклинивания колеса (прекращения вращения). Оно меняется мгновенно при торможении, и чем оно меньше, тем выше риск заклинивания. Введение этого критерия позволяет более точно определять риск полной остановки вращения КП и повышает надежность определения возникновения юза. С другой стороны, тормоза в идеале должны быть отпущены, то есть давление в ТЦ полностью сброшено за время не большее для того, чтобы предотвратить заклинивание.

Время, требуемое для того, чтобы полностью сбросить давление в ТЦ (T_x), включая ступень «фазового опорожнения», может быть измерено при статических испытаниях тормозов и может быть применено без изменения к движущемуся подвижному составу. Следовательно, в ТЦ начинается процесс «фазового опорожнения», если T_L уменьшается до уровня более низкого, чем постоянные значения, основанного на значении T_x , которое считается пороговым.

Степень скольжения может быть оценена, используя значение, описанное в единицу времени, и как таковое это время может быть определено для того, чтобы обеспечить полное опорожнение ТЦ.

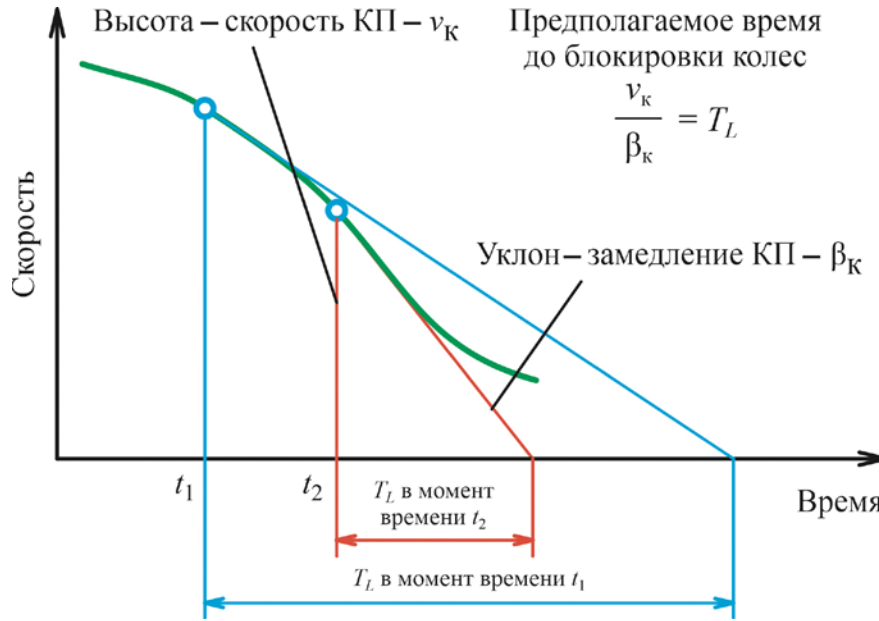


Рис. 1. Определение T_L — времени до заклинивания колеса

Этот алгоритм является новым, так как за контролируруемую величину принимается не только разница скоростей КП или их ускорение (замедление), а время до заклинивания T_L . Принцип работы системы TL-WSP, реализующей этот алгоритм, показан на рис. 2.

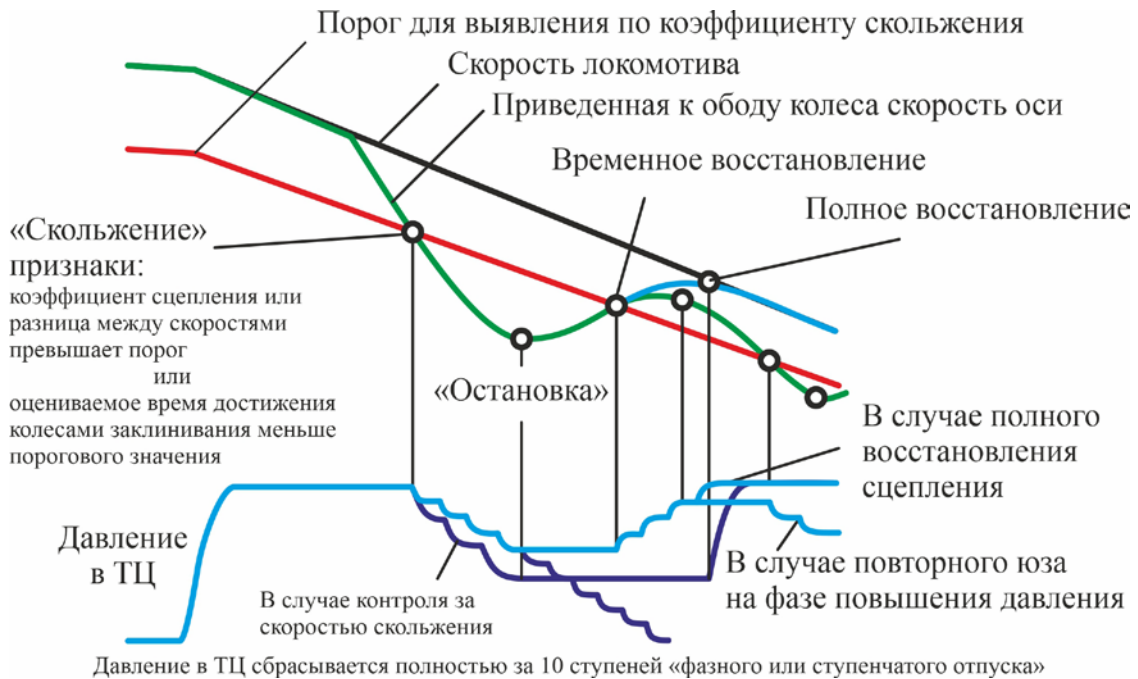


Рис. 2. Работа системы TL-WSP

Работа предлагаемой системы противоюзовой защиты TL-WSP основана на определении времени до заклинивания КП, для чего необходимо определение не только угловой скорости ее вращения, но и величины углового ускорения. В реальном устройстве угловая скорость вращения КП измеряется датчиком частоты вращения, установленном на буксовом узле КП. В процессе движения по пути с неровностями частота вращения КП изменяется не только вследствие процессов в месте контакта «колесо — рельс», но и имеет колебания, которые являются следствием пространственных колебаний экипажной части локомотива. Кроме того, необходимо учитывать наличие погрешностей измерения угловой скорости КП (ошибка канала измерения). При исправном и тарированном датчике частоты вращения эта ошибка в общем случае является случайной и имеет нормальный закон распределения.

Колебания, вызванные наличием эффектов пространственной динамики, имеют частоты, близкие к частотам колебаний, являющимися следствием процессов в месте контакта «колесо — рельс», которые анализируются в системе защиты от боксования и юза. Прямое, без использования фильтров, дифференцирование сигнала частоты вращения КП приводит к появлению сильного шума и делает практически невозможным использование определенной таким образом величины углового ускорения КП для целей защиты от юза или боксования.

Применение для обработки сигнала с датчика частоты вращения аналоговых фильтров первого или второго порядка не дает необходимого эффекта устранения погрешностей канала измерений либо подавляет полезный сигнал о скорости изменения частоты вращения КП. Использование цифровых фильтров (Баттерворта, Чебышева) второго или третьего порядка не позволяет существенно улучшить результат. Поэтому для устранения ошибок канала измерения и выделения сигнала об угловом ускорении КП в условиях наличия колебаний, вызванных наличием эффектов пространственной динамики локомотива, целесообразно применение дискретного фильтра Калмана [7–9]. Для аналогичных целей фильтр Калмана также используется в системах управления движением не только железнодорожных экипажей, но и автомобилей и других транспортных средств [10–12].

Для решаемой задачи выделения углового ускорения КП по измеренной угловой скорости вращения необходимо использовать линейный фильтр Калмана третьего порядка [13] с моделью процесса в дискретной форме вида:

$$\omega_{k+1} = \omega_k + \Delta t \varepsilon_k + \frac{\Delta t^2}{2} \kappa_k, \quad (1)$$

где ω , ε и κ — угловая скорость вращения, угловое ускорение и скорость изменения углового ускорения КП;

Δt — шаг дискретизации фильтра.

Фильтр Калмана [14] создается на основе динамического описания объекта управления, полученного с учетом (1). В рассматриваемом случае переменными состояния являются угловая скорость вращения, угловое ускорение и скорость изменения углового ускорения КП. В качестве управляющего воздействия выступает величина известного изменения углового ускорения. Измеряемой величиной является угловая скорость вращения КП.

Математическое моделирование процесса механического торможения электровоза

Для исследования работы предлагаемой системы противоюзовой защиты была разработана математическая модель электровоза ЧС7. Моделирование динамических процессов в экипажной части рассматриваемого локомотива выполняется с использованием подхода, который основан на представлении моделируемого электровоза в виде системы твердых тел (СТТ). Механическая часть представляется в виде системы тел, связанных силовыми элементами и кинематическими связями. Эффекты, связанные с учетом напряженно-деформированного состояния элементов экипажной части: кузова, рам тележек, корпусов ТЭД, редукторов и т. п., не дают существенного вклада в рассматриваемые процессы, но значительно усложняют модель. Поэтому в дальнейшем они не учитываются. Для составления модели используется программный комплекс «Универсальный механизм» [15, 16].

Экипажная часть секции электровоза ЧС7 состоит из кузова и 2 двухосных тележек [17]. Кузов имеет вагонную конструкцию с несущей рамой. На тележках установлены 2 колесо-моторных блока, состоящих из тягового двигателя, редуктора и КП, соединенных с тележкой элементами первой ступени подвешивания. На электровозе применен тяговый привод III класса, с опорно-рамным подвешиванием тягового двигателя и редуктора. Соединение тележек и кузова осуществляется с помощью второй ступени подвешивания, которая состоит из системы пружин и амортизаторов (гасителей колебаний). Для соединения секций электровоза между собой и с другим подвижным составом на буферных брусах рамы кузова установлены автосцепные устройства типа СА-3 с поглощающими аппаратами.

Передача продольных усилий от тележек к кузову осуществляется с помощью шкворня, который одним концом шарнирно установлен на средней поперечной балке тележки, а вторым концом закреплен на поперечных балках рамы кузова. Такой механизм передачи продольных усилий от тележки к кузову приводит к значительному перераспределению нагрузок от осей КП на рельс [9]. Этот эффект сильнее выражен в режиме тяги, в котором активный момент передается на КП от ТЭД через редуктор. В режиме механического торможения, когда тормозной момент создается непосредственно на колесе, влияние этого эффекта несколько ниже, но, все равно, требует учета. Поэтому при составлении математической модели для описания механических процессов в экипажной части электровоза ЧС7

необходимо рассматривать все элементы конструкции секции (кузов, тележки, колесо, моторные блоки) и взаимосвязи между ними, а также элементы связи между секциями локомотива.

С учетом изложенных выше положений, расчетная схема механической части секции электровоза ЧС7, представленной в виде СТТ, включает в себя кузов и две тележки. Каждая тележка состоит из рамы и двух колесно-моторных блоков. Всего в состав расчетной схемы входят 54 тела, она имеет 104 степени свободы. Модель электровоза в составе двух секций содержит 108 тел и имеет 208 степеней свободы.

При составлении модели электровоза использовался метод подсистем. Модель секции состоит из кузова и двух включенных подсистем — тележек. В свою очередь, модель тележки состоит из рамы и двух включенных подсистем — колесно-моторных блоков. Вид модели электровоза ЧС7 в программе моделирования комплекса «Универсальный механизм» представлен на рис. 3.

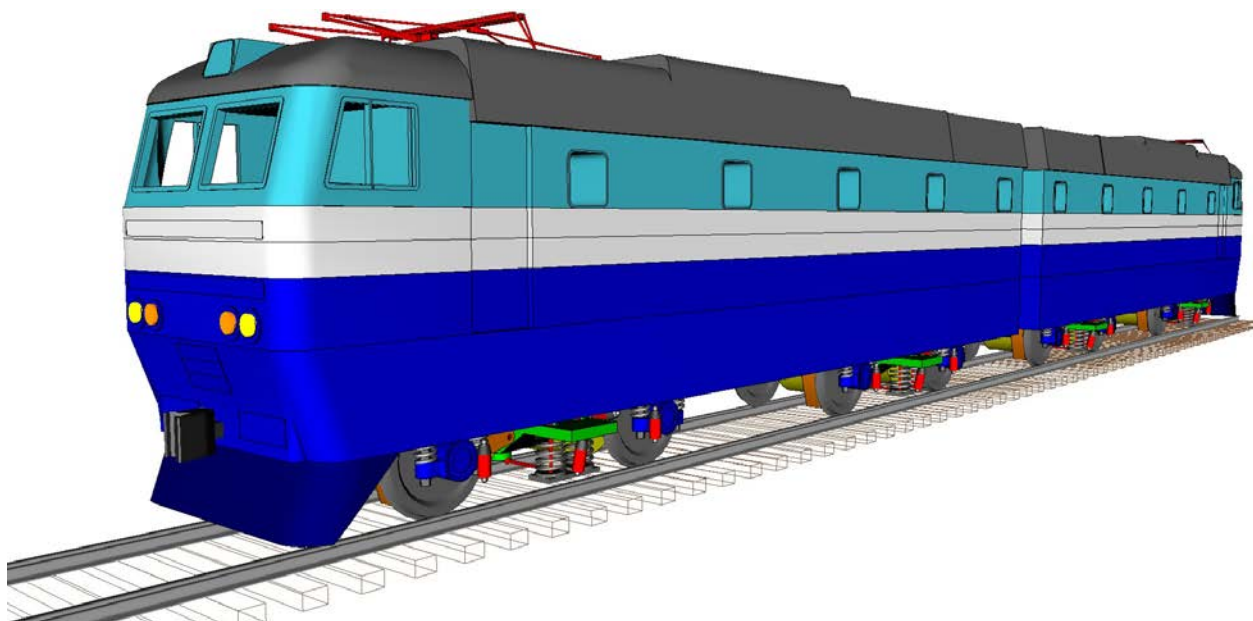


Рис. 3. Модель электровоза ЧС7 на рельсовом пути в программном комплексе «Универсальный Механизм»

Анализ работы предлагаемой системы защиты от юза

Для исследования работы предлагаемых принципов обнаружения и ликвидации юза и боксования был выполнен ряд расчетов с использованием описанной математической модели динамических процессов в экипажной части электровоза ЧС7. Был рассмотрен случай торможения одиночно следующего локомотива со скорости 15 м/с при движении по пути с неровностями, соответствующими плохому содержанию пути. Коэффициент сцепления был принят равным 0,25. На рис. 4 приведены результаты расчетов. На рисунке показаны графики изменения ступени

торможения $N_{\text{тц}}$, давления в ТЦ $P_{\text{тц}}$, угловой скорости вращения первой по движению КП $\omega_{\text{кп}}$. Также показаны угловая скорость скольжения этой КП и ее значение после обработки с использованием описанного в разделе 3.2 подхода $\omega_{\text{ск}}$ и $\omega_{\text{скф}}$, угловое ускорение до и после фильтрации $\varepsilon_{\text{кп}}$ и $\varepsilon_{\text{кпф}}$, опорный сигнал об ускорении КП $\varepsilon_{\text{кп max}}$. Приведены силы сцепления левого и правого колес $F_{\text{хл}}$ и $F_{\text{хп}}$.

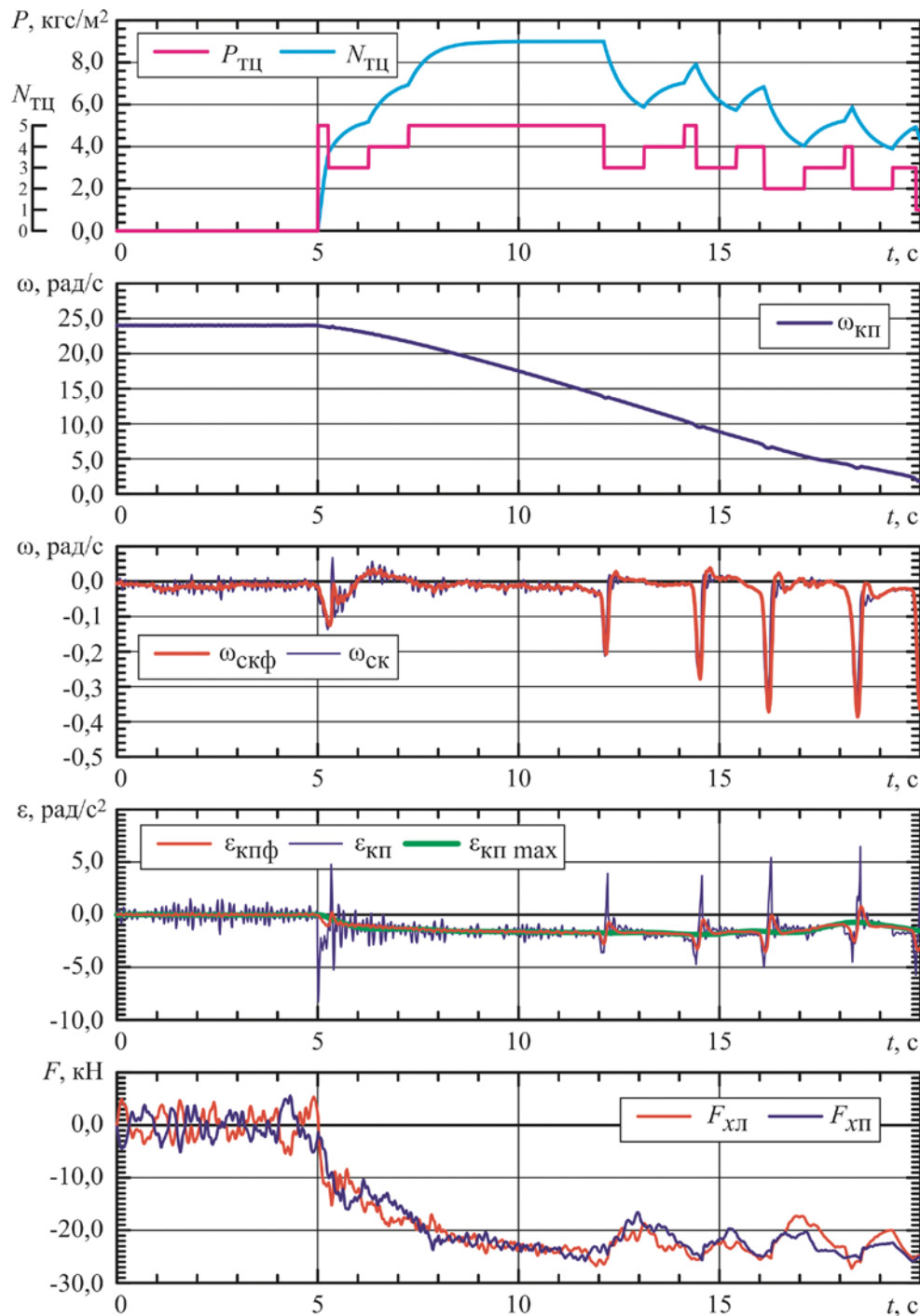


Рис. 4. Результаты математического моделирования процессов в экипажной части электровоза ЧС7 в режиме механического торможения со скорости 15 м/с до остановки

Анализ приведенных результатов показывает, что использование предлагаемого подхода к обработке сигналов о частоте вращения КП позволяет существенно уменьшить влияние колебаний, возникающих при движении по пути с неровностями. В результате получаемая на выходе фильтра величина колебаний угловой скорости вращения КП снижается до значений, позволяющих использовать ее для определения избыточного скольжения при идентификации процессов юза и боксования. Выделяемый сигнал об угловом ускорении КП также имеет незначительные колебания и может быть использован для определения моментов начала и окончания процессов потери и восстановления сцепления.

После начала торможения давление в ТЦ поднимается до максимального значения. При скорости электровоза 15 м/с создаваемого тормозного усилия оказывается недостаточно для возникновения юза. По мере снижения скорости коэффициент трения тормозных колодок о колесо увеличивается, сила торможения превышает силу сцепления и начинается процесс юза рассматриваемой КП. Когда величины угловой скорости скольжения и углового ускорения КП превышают пороговые значения, идентифицируется возникновение юза. Для недопущения его развития происходит отпуск тормозов на две ступени. После снижения величин скольжения и углового ускорения КП до значений ниже установленных, идентифицируется восстановление сцепления и завершение юза. После установленной задержки времени в 1 с происходит увеличение позиции торможения на одну ступень. Так как срыва сцепления не происходит, то еще через 1 с позиция торможения увеличивается еще на одну ступень. В дальнейшем, при срыве сцепления и возникновении юза эти действия повторяются.

Так как скорость электровоза продолжает снижаться, коэффициент трения колодок увеличивается, что вызывает рост тормозного усилия и неоднократное возникновение юза. Предлагаемый способ обработки сигналов частоты вращения КП, алгоритмы выявления и прекращения юза позволяют не допустить значительного проскальзывания колес и избежать их заклинивания. Своевременное обнаружение возникновения юза и восстановления сцепления позволяет избежать значительного снижения тормозного усилия и обеспечить эффективную работу тормозной системы электровоза.

Выводы

Анализ полученных результатов показывает, что применение разработанных алгоритмов работы системы защиты от юза и боксования позволяет обнаруживать избыточное скольжение КП уже на ранних стадиях потери сцепления. Обработка сигналов с использованием фильтра Калмана при наличии опорного сигнала позволяет существенно снизить влияние пространственных колебаний экипажной части электровоза при движении по пути с неровностями на выделяемые сигналы угловой скорости вращения и углового ускорения КП. Это дает

возможность снизить пороги срабатывания и идентифицировать юз и боксование до появления значительного избыточного скольжения. В результате за счет своевременного принятия мер по снижению тягового или тормозного усилия, появляется возможность избежать развития прогрессирующего боксования или заклинивания КП.

Библиографический список

1. Противоюзные устройства подвижного состава / М. Д. Фокин, А. А. Лоскутов, А. К. Второв. М.: Транспорт, 1970. 102 с.
2. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / У. Д. Харрис; под общ. ред. С. М. Захарова, В. М. Богданова; пер. с англ. С. М. Захарова, С. С. Карцева, В. Л. Мельникова и др. М.: Интекст, 2002. 408 с.
3. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием системы колесо — рельс: сб. науч. тр. / под общ. ред. С. М. Захарова. М.: ВНИИЖТ, 2017. 420 с.
4. Асинхронный тяговый привод локомотивов: учебное пособие / А. А. Зарифьян; под общ. ред. А. А. Зарифьяна. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. 414 с.
5. Hasegawa I., Kayashima K. Brake Technology for 140 km/h Operation of Narrow — Gauge Lines // RTRI Report. 1999. Vol. 13, no. 10. P. 35–40.
6. Nakazawa S.-I. Development of a New Wheel Slide Protection System Using a New Detection Algorithm // Quarterly Report of RTRI. 2011. Aug. Vol. 52, no. 3. P. 136–140.
7. Куликова М. В., Куликов Г. Ю. Численные методы нелинейной фильтрации для обработки сигналов и измерений // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21, № 4. С. 64–98.
8. Mal K., Hussain I., Chowdhry B. S., et. al. Extended Kalman filter for estimation of contact forces at wheel-rail interface // 3C Tecnologша. Glosas de innovacion aplicadas a la pyme. Edicion Especial. 2020. Apr. P. 279–301.
9. Wang S., Xiao J., Huang J., et. al. Locomotive wheel slip detection based on multi-rate state identification of motor load torque // Journal of the Franklin Institute. 2016. Vol. 353, no. 2. P. 521–540. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003215004287>.
10. Alshawi A. An Adaptive Unscented Kalman Filter for the Estimation of the Vehicle Velocity Components, Slip Angles, and Slip Ratios in Extreme Driving Manoeuvres // Sensors. 2024. Jan. Vol. 24, no. 2. P. 436.
11. Kong J., Pfeiffer M., Schildbach G., et. al. Kinematic and dynamic vehicle models for autonomous driving control design // 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). 06/2015. P. 1094–1099.
12. Mei T., Hussain I. Detection of wheel-rail conditions for improved traction control // IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010). 04/2010. P. 1–6.
13. Maridor J., Markovic M., Perriard Y. Kalman filter to measure position and speed of a linear actuator // 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 05/2011. P. 330–335.

14. Simon D. Fundamentals of Kalman Filters. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. XXVI, 502 p.
15. Универсальный механизм. Официальный сайт / Д. Ю. Погорелов. ООО «Вычислительная механика». Вер. 9.1. 2024. URL: www.umlab.ru (дата обращения: 25.03.2014).
16. Pogorelov D. Simulation of Rail Vehicle Dynamics with Universal Mechanism Software // Rail Vehicle Dynamics and Associated Problems. Gliwice: Silesian University of Technology, 01/2005. P. 13–58.
17. Машинисту об электровозе ЧС7 / И. И. Карасев, Л. П. Ратомский. М.: Транспорт, 2012. 223 с.

Дата поступления: 15.03.2024

Решение о публикации: 20.04.2024

Контактная информация:

КОЛПАХЧЬЯН Павел Григорьевич — докт. техн. наук, доцент; kolpakhchyan@pgups.ru

АНДРЕЕВ Владимир Евгеньевич — доцент; elt@pgups.ru

Improving the anti-skid system of a passenger electric locomotive

P. G. Kolpakhchyan, V. E. Andreev

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Kolpakhchyan P. G., Andreev V. E.* Improving the anti-skid system of a passenger electric locomotive // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 2. P. 100–113. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-100-113.

Abstract

Objective: improving algorithms for protection against skidding and slipping using new methods for detecting excessive slipping of locomotive wheel pairs, allowing for early detection of the moment of loss of adhesion.

Methods: the effectiveness of an anti-skid system is largely determined by the reliable detection of the occurrence of excessive wheel slip. Solving this problem requires the development of methods for isolating signals from the angular velocity of rotation and angular acceleration of the wheelset, taking into account dynamic processes in the mechanical part of the locomotive and interference in the measurement channel. Therefore, the article discusses the issues of processing rotation speed signals, extracting information about the amount of excess slip and angular acceleration of the wheelsets for use in anti-skid and skidding systems. One of the criteria that can improve the reliability of skid detection is proposed to use the “Estimated time before wheel locking”. Its value allows you to define the estimated time before the wheel jams (stops rotation). The introduction of this criterion makes it possible to more accurately determine the risk of a complete stop of wheelset rotation and increases the reliability of determining the occurrence of skidding.

Results: it has been established that to eliminate errors in the measurement channel and isolate the signal about the angular acceleration of the wheelset in conditions of the presence of oscillations caused by the presence of the effects of the spatial dynamics of the locomotive, it is advisable to use a discrete Kalman filter. Signal processing using a Kalman filter in the presence of a reference signal makes it possible to significantly

reduce the influence of spatial vibrations of the undercarriage of an electric locomotive when moving along a track with irregularities on the extracted signals of the angular velocity of rotation and angular acceleration of the wheelset. This makes it possible to reduce response thresholds and identify skidding and skidding before significant excess slip occurs. **Practical importance:** the necessity of using complex criteria based on the analysis of not only the slipping speed of wheelsets, but also angular accelerations, is shown to identify excessive slipping of locomotive wheelsets. Their use in the locomotive control system makes it possible to detect loss of adhesion in the early stages of slipping and skidding and improve the use of the adhesion weight of locomotives.

Keywords: anti-skid protection, train-track interaction, wheel — rail adhesion, wheelsets sliding, skid detection algorithm.

References

1. Protivojuznye ustrojstva podvizhnogo sostava / M. D. Fokin, A. A. Loskutov, A. K. Vtorov. M.: Transport, 1970. 102 s. (In Russian)
2. Obobshhenie peredovogo opyta tjazhelovesnogo dvizhenija: voprosy vzaimodejstvija kola i rel'sa / U. D. Harris; pod obshh. red. S. M. Zaharova, V. M. Bogdanova; per. s angl. S. M. Zaharova, S. S. Karceva, V. L. Mel'nikova i dr. M.: Intekst, 2002. 408 s. (In Russian)
3. Obobshhenie mirovogo opyta tjazhelovesnogo dvizhenija. Upravlenie sodержaniem sistemy koleso — rel's: sb. nauch. tr. / pod obshh. red. S. M. Zaharova. M.: VNIIZhT, 2017. 420 s. (In Russian)
4. Asinhronnyj tjagovyj privod lokomotivov: uchebnoe posobie / A. A. Zarif'jan; pod obshh. red. A. A. Zarif'jana. M.: FGBOU "Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zhelezno-dorozhnom transporte", 2013. 414 s. (In Russian)
5. Hasegawa I., Kayashima K. Brake Technology for 140 km/h Operation of Narrow — Gauge Lines // RTRI Report. 1999. Vol. 13, no. 10. P. 35–40.
6. Nakazawa S.-I. Development of a New Wheel Slide Protection System Using a New Detection Algorithm // Quarterly Report of RTRI. 2011. Aug. Vol. 52, no. 3. P. 136–140.
7. Kulikova M. V., Kulikov G. Ju. Chislennye metody nelinejnoj fil'tracii dlja obrabotki signalov i izmerenij // Vychislitel'nye tehnologii. 2016. T. 21, № 4. S. 64–98. (In Russian)
8. Mal K., Hussain I., Chowdhry B. S., et. al. Extended Kalman filter for estimation of contact forces at wheel-rail interface // 3C Tecnologia. Glosas de innovacion aplicadas a la pyme. Edicion Especial. 2020. Apr. P. 279–301.
9. Wang S., Xiao J., Huang J., et. al. Locomotive wheel slip detection based on multi-rate state identification of motor load torque // Journal of the Franklin Institute. 2016. Vol. 353, no. 2. P. 521–540. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003215004287>.
10. Alshawi A. An Adaptive Unscented Kalman Filter for the Estimation of the Vehicle Velocity Components, Slip Angles, and Slip Ratios in Extreme Driving Manoeuvres // Sensors. 2024. Jan. Vol. 24, no. 2. P. 436.
11. Kong J., Pfeiffer M., Schildbach G., et. al. Kinematic and dynamic vehicle models for autonomous driving control design // 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). 06/2015. P. 1094–1099.

12. Mei T., Hussain I. Detection of wheel-rail conditions for improved traction control // IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010). 04/2010. P. 1–6.

13. Maridor J., Markovic M., Perriard Y. Kalman filter to measure position and speed of a linear actuator // 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 05/2011. P. 330–335.

14. Simon D. Fundamentals of Kalman Filters. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. XXVI, 502 p.

15. Universal'nyj mehanizm. Oficial'nyj sajt / D. Ju. Pogorelov. OOO "Vychislitel'naja mehanika". Ver. 9.1. 2024. URL: www.umlab.ru (data obrashhenija: 25.03.2014). (In Russian)

16. Pogorelov D. Simulation of Rail Vehicle Dynamics with Universal Mechanism Software // Rail Vehicle Dynamics and Associated Problems. Gliwice: Silesian University of Technology, 01/2005. P. 13–58.

17. Mashinistu ob jelektrovoze ChS7 / I. I. Karasev, L. P. Ratomskij. M.: Transport, 2012. 223 s. (In Russian)

Received: 15.03.2024

Accepted: 20.04.2024

Author's information:

Pavel G. KOLPAKHCHYAN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; kolpakhchyan@pgups.ru

Vladimir E. ANDREEV — Associate Professor; elt@jjpgups.ru